

1. Was ist Elektrizität?

1. Was ist Elektrizität? Elektrizität ist eine Energieform, deren Bedeutung ständig steigt. Im Haushalt, im Gewerbe, in der Industrie, in allen Bereichen des täglichen Lebens nimmt der Verbrauch dieser Energie immer mehr zu.

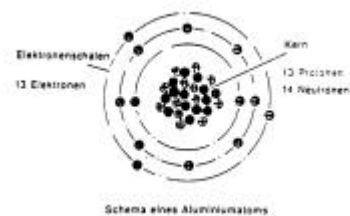
Die Vorteile: Die elektrische Energie läßt sich einfach und mit bestem Wirkungsgrad in andere Energieformen wie Wärme, Licht und Kraft umwandeln. Sie kann leicht zum Verbraucher geführt werden und aufgrund ihrer Gesetzmäßigkeiten exakt berechnet, übersetzt und gemessen werden.

Die Naturerscheinung der Elektrizität war vor mehr als zwei Jahrtausenden den Griechen schon bekannt, als sie beobachteten, daß Bernstein durch Reiben in die Lage versetzt wurde, z.B. Wollfäden anzuziehen. Aus dem griechischen Wort „Elektron“ für Bernstein wurden später die Begriffe: Elektrizität, Elektronen abgeleitet. Ein weiter Weg von dieser Entdeckung der Reibungselektrizität bis zum heutigen Stand der Elektrotechnik.

Atomaufbau:

Die kleinste, chemisch nicht mehr teilbare Einheit eines Grundstoffes ist das Atom. Die Atomphysik weist jedoch nach, daß jedes Atom wiederum aus noch kleineren Teilchen besteht: dem Atomkern und den Elektronen. Die Elektronen umkreisen den Kern mit großer Geschwindigkeit in mehreren Bahnen, den „Schalen“. Den Zusammenhalt innerhalb des Atoms bewirken elektrische Kräfte. Die Elektronen haben eine negative Elementarladung. Der Atomkern besteht aus Protonen mit gleich großer positiver Elementarladung und Neutronen, die ungeladen, also neutral sind. Je nach Art des Grundstoffes bindet eine Anzahl Protonen die gleiche Anzahl Elektronen auf den Elektronenschalen. Der Atomaufbau ist um so komplizierter, je schwerer der Körper ist. So hat Wasserstoff den einfachsten Aufbau mit 1 Elektron und 1 Proton. Lithium hat 3 Elektronen und entsprechend 3 positiv geladene Protonen im Kern, Kupfer hat 29 Kernladungen und Elektronen - bis zum Uran mit der Kernladung 92.

Während die Elektronen in unmittelbarer Nähe des Kernes infolge der großen Anziehungskraft fest an den Kern gebunden sind, ist diese Kraft auf die Elektronen in den äußeren Schalen nicht mehr so groß. Diese Elektronen können durch besondere Kräfte aus ihren Bahnen gelenkt werden. Besonders leicht beweglich sind diese äußersten Elektronen der Metallatome, die durch Beeinflussung der Nachbaratome schon abgelenkt werden können und als „freie Elektronen“ in unregelmäßiger Bewegung verschiedener Richtung von einem zum anderen Atom sind. Dadurch wird das Gleichgewicht zwischen der positiven Kernladung und den negativen Elektronen gestört. Ein Atom wird bei Abgabe von negativen Elektronen durch die nun überwiegende positive Kernladung elektrisch positiv. Ein solches elektrisch geladenes Atom wird als Ion bezeichnet.



Ein solches elektrisch geladenes Atom wird als Ion bezeichnet.

**Das positive Ion (Kation) hat Elektronenmangel.
Ein negatives Ion (Anion) hat Elektronenüberschuß.**

Leiter

Die Zahl der freien Elektronen bestimmt die Leitfähigkeit eines Stoffes. Stoffe mit vielen freien Elektronen, überwiegend Metalle sind Leiter der Elektrizität.

Gute Leiter sind z.B. Silber, Kupfer, Aluminium. Werden durch fremde Kräfte die freien Elektronen in eine Richtung bewegt, fließt durch die Leiter ein elektrischer Strom.

Auch in Säuren, Laugen, Salzen und Gasen kann unter bestimmten Voraussetzungen ein Strom fließen. Die Elektronenbewegung ist hier verbunden mit einer Wanderung von Ionen.

Nichtleiter:

Nichtleiter oder Isolatoren haben keine oder kaum bewegliche Elektronen und können deshalb die Elektrizität nicht leiten. Sie dienen der Isolierung von Leitern gegeneinander oder gegen Berührung. Die bekanntesten Isolierstoffe sind: Kunststoffe, Porzellan, Glas, Öl. Im Rohrheizkörper isoliert Magnesiumoxyd (MgO) die Heizwendel elektrisch gegen das Rohr.

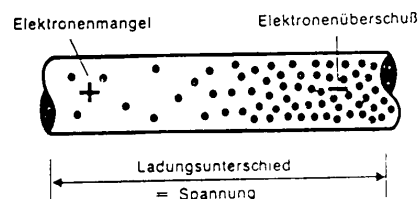
Halbleiter:

Zwischen Leiter und Nichtleiter sind, wie der Name schon sagt, die Halbleiter einzuordnen. Komplizierte Kristallgitter- und Grenzschichtvorgänge lassen manche Halbleiter steuerbar leitend oder sperrend werden. Die Stoffe Selen, Germanium, Silicium z.B. finden in Transistoren und Dioden Verwendung als Gleichrichter, Verstärker, elektronische Schalter.

Die Darstellung des Atomaufbaues der Stoffe zeigt: Elektrizität ist eine Naturerscheinung. Die Elektrizitätserzeugung ist also nur eine Verschiebung von Elementarladungen, die in jedem Stoff vorhanden sind.

2. Spannung

Das Ladungsgleichgewicht der Elektronenbesetzung der Atome kann durch besondere Kräfte wie Reibung, Wärme, Magnetismus geändert werden. Positive und negative Elementarladungen werden unter Energieaufwand voneinander getrennt. Es entsteht an einer Stelle Elektronenmangel, sie ist elektrisch positiv; an einer anderen Elektronenüberschuß, sie ist elektrisch negativ. Die Atome haben aber das Bestreben, ihren neutralen Gleichgewichtszustand wieder herzustellen.



Das Ausgleichsbestreben zwischen verschiedenen Ladungen nennt man elektrische Spannung. Die Ursprungspannung in einem Spannungserzeuger ist die Ursache für einen Stromfluß.

Die elektrische Spannung hat das Formelzeichen U und wird in Volt (Kurzzeichen V) gemessen.

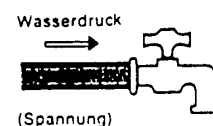
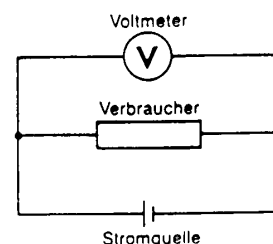
Spannung U [V]

Die Spannung U tritt stets zwischen 2 Punkten eines elektrischen Systems mit einem Ladungsunterschied (Potential) auf. Je größer der Ladungsunterschied, desto höher ist die Spannung. Zur Messung der Spannung wird ein Spannungsmesser (Voltmeter) an die Klemmen des Erzeugers oder des Verbrauchers angeschlossen.

Die elektrische Spannung kann symbolisch mit dem Druck in einer Wasserleitung verglichen werden.

Spannungserzeugung:

Die elektrische Spannung entsteht im Spannungserzeuger. Es ist eine Gleichspannung, wenn ein Pol stets negative Ladung, der andere positive Ladung hat. Wechselt die Polarität ständig, so liefert der Erzeuger Wechselspannung.



Spannung kann erzeugt werden:

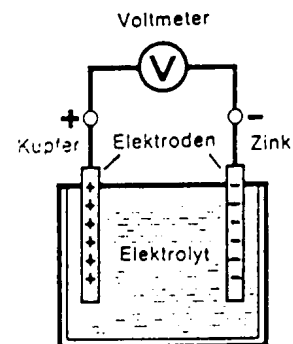
a) durch Reiben zweier geeigneter Körper = Reibungselektrizität: An den Reibungsflächen erfolgt ein Austausch von Elektronen. Während ein Körper nun Elektronenüberschuß haben kann, fehlen dem anderen Körper diese Elektronen. Diese älteste bekannte Art der Spannungserzeugung (Reiben von Bernstein) hat heute keine Nutzenanwendung, sie tritt ungewollt störend auf bei Riemenantrieben, durch statische Aufladung beim Reiben von Textilien oder Kunststoffen. Es können hohe Spannungen auftreten, die sich unter Funkenbildung ausgleichen.

b) durch chemische Wirkung: In galvanischen Elementen (Galvani, ital. Naturforscher) werden unterschiedliche Metalle (Elektroden) in Lösungen (Elektrolyten) zersetzt. Bei dieser Auflösung werden z.B. von einer Zinkelektrode in verdünnter Schwefelsäure Zinkatome getrennt, die hierbei Elektronen verlieren und als positive Zinkionen in die Lösung gehen. Dadurch wird die Zinkelektrode negativ, eine zweite Elektrode aus Kupfer nimmt die positiven Ladungen an und wird positiv.

Galvanische Elemente werden als Taschenlampenbatterien, Anodenbatterien, Monozellen verwendet.

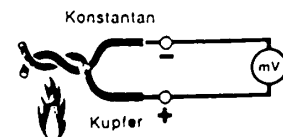
Auch die Akkumulatoren (Akkus) liefern den Strom als chemisches Element. Der spannungserzeugende chemische Zustand wird jedoch vorher durch Anlegen einer Spannung (Aufladung) immer wieder hergestellt, während die anderen Elemente sich „verbrauchen“.

Die Gleichspannung der Elemente liegt zwischen 1-2 Volt. Die Spannungen addieren sich in der Hintereinanderschaltung. (z.B. Taschenlampenbatterie $4,5\text{ V} = 3 \times 1,5\text{ V}$).



In jüngster Zeit werden sogenannte Brennstoffelemente entwickelt; in ihnen wird die chemische Energie der Brennstoffe ohne Umweg direkt in elektrische Energie umgewandelt (kalte Verbrennung).

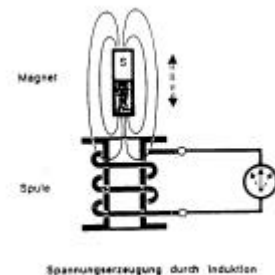
c) durch Wärme: In den Thermoelementen werden in einer Verbindungsstelle von zwei verschiedenen Metallen durch Erwärmung Elektronen von einem Metall in das andere gedrückt. Die entstehenden geringen Spannungen werden zur Temperaturmessung verwendet.



d) durch Licht: Lichtstrahlen können aus bestimmten Halbleitern Elektronen lösen. Diese Fotoelemente werden für elektronische Steuerungen, für Belichtungsmessung und als Spannungserzeuger z.B. für Satelliten verwendet (Solarzellen).

e) durch Druck: In manchen Kristallen (z.B. Quarz) können durch Druck, auch Dehnung an den Flächen während des ab- oder zunehmenden Druckes elektrische Ladungen entstehen. Dieser sogenannte piezoelektrische Effekt findet bei Druckmessungen Anwendung sowie in Kristalltonabnehmern (mech. Druck) und in Kristallmikrofonen (Schalldruck).

f) durch Magnetismus = Induktion: Wird ein elektrischer Leiter in einem Magnetfeld bewegt, so wird in ihm eine Spannung induziert, indem die freien Elektronen des Leiters beim Durchdringen des Magnetfeldes zu einem Ende hin verdrängt werden. Es entsteht an einem Ende des Leiters Elektronenüberschuß, am anderen Ende Elektronenmangel. Die gleiche Erscheinung tritt beim Bewegen eines Magneten in einer Spule auf.



Auf diesem Prinzip der Änderung oder Bewegung eines die Spulenwindungen beeinflussenden Magnetfeldes beruhen die elektrischen Generatoren. In ihnen wird mechanische Energie bei sehr hohem Wirkungsgrad in elektrische Energie umgewandelt. Große Energiemengen und hohe Wechselspannungen können erzeugt werden, um den großen Energiebedarf zu decken.

Spannungsbenennung:

Als Kleinspannungen bezeichnet man Spannungen bis 50 Volt („Schwachstrom“), wie sie z.B. in der Fernmeldetechnik üblich sind. Für Starkstromanlagen (Licht- und Kraftnetze) werden Spannungen über 100 Volt benutzt.

So beträgt die in Deutschland derzeit übliche Netzspannung 230 V, in den Drehstromnetzen 230/400 V für größere Verbraucher wie Durchlauferhitzer, große Motoren, Elektro-Wärmespeicher.

Die Nennspannung ist auf dem Typenschild des jeweiligen Gerätes genannt und gibt an, an welche Netzspannung das Gerät anzuschließen ist.

Für die Fernübertragung der elektrischen Energie in Überlandfreileitungen schließlich verwendet man Hochspannungen von einigen 1000 V bis zur Höchstspannung von 400 000 V (400 kV).

Umrechnung: Umrechnung: 1 Kilovolt = 1 kV = 1000 V

1 Millivolt = 1 mV = $\frac{1}{1000}$ V

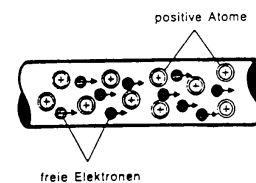
Vergleichsbeispiele: Einige Vergleichsbeispiele der Spannung:

Blitz	ca. 100 000 000	V
Höchstspannungsleitung	400 000	V
Hochspannungsleitung	30 000	V
Zündung im Kfz	5000	V
Straßenbahn	500	V
Drehstromnetze	380	V
Lampen in einer Dimmeranlage	220	V
Auto-Akku 6 x 2 V =	12	V
Monozelle (Einzelzelle)	1,5	V
Thermoelementspannung (Kupfer-Konstantan bei 100°C)	0,004	V

3. Strom

Stellt man zwischen den Polen eines Spannungserzeugers eine leitende Verbindung her, so kommt es zu einem Elektronenfluß.

Der Spannungserzeuger drückt vom negativen Pol, der Klemme mit dem Überschuß an freien Elektronen, diese in den Leiter hinein. Diese Elektronen stoßen die im Leiter vorhandenen freien Elektronen in einer Richtung zur positiven Klemme des Spannungserzeugers vor sich her.



Bewegung der freien Elektronen unter dem Einfluß einer Spannung

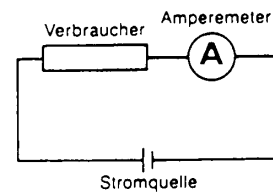
Während die Elektronenwanderung selbst verhältnismäßig langsam ist, sich aber alle freien Elektronen durch die abstoßenden Kräfte zugleich bewegen, hat die Elektrizität im Leiter die sehr große Geschwindigkeit von fast 300 000 km/s.

Die durch die Spannung zustandegekommene Elektronenbewegung nennt man den elektrischen Strom.

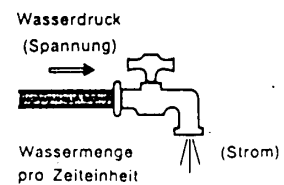
Der elektrische Strom hat das Formelzeichen I und wird in Ampere (Kurzzeichen A) gemessen.

Strom I [A]

Der Strom I , der durch einen Leiter fließt, ist um so stärker, je mehr Elektronen sich in einer Zeiteinheit durch den Querschnitt des Leiters bewegen. Zur Messung des Stromes wird ein Strommesser (Amperemeter) in die Leitung geschaltet.



Der elektrische Strom kann verglichen werden mit der Wassermenge, die in einer Zeiteinheit durch den Querschnitt der Wasserleitung fließt.



Stromkreis:

Die Bedingung für einen Strom ist das Vorhandensein einer Spannung und ein geschlossener Stromkreis.

Der Stromkreis besteht mindestens aus einer Spannungsquelle, den Leitungen und einem Verbraucher.

Spannung ist vorhanden, solange der Spannungserzeuger an seinen Anschlußklemmen Elektronenmangel und -überschuß erzeugt.

Für einen Kreislauf der Elektronen zwischen Spannungsquelle und Verbraucher ist ein Hinleiter und ein Rückleiter erforderlich. Sie können zu mehradrigen „Zuleitungen“ zusammengefaßt sein.

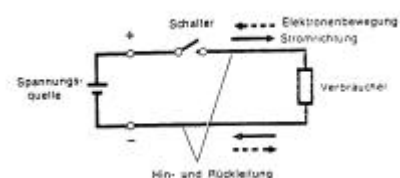
Verbraucher sind alle Geräte, in denen die Wirkungen des elektrischen Stromes genutzt werden (z.B. Glühlampen, Motoren, Elektrowärmegeräte und viele andere).

Mit einem Schalter kann durch Schließen oder Öffnen der Stromfluß eingeleitet oder unterbrochen werden.

Alle Schaltungen der Elektrotechnik lassen sich auf den einfachen Stromkreis zurückführen. Auch komplizierte Schaltungen kann man in einzelne Stromkreise zerlegen, um ihre gegenseitige Beeinflussung zu erkennen.

Stromrichtung:

Die Elektronenbewegung ist im äußeren Stromkreis vom Minuspol des Erzeugers über den Verbraucher



$$1 \text{ Mikroampere} = 1 \mu\text{A} = \frac{1}{1000000} \text{ A}$$

4. Widerstand

Die freien Elektronen, die bei Stromfluß zwischen den Atomen eines Körpers hindurchfluten müssen, werden hierbei in ihrer Bewegung behindert. Jeder Leiter setzt dem elektrischen Strom einen Widerstand entgegen.

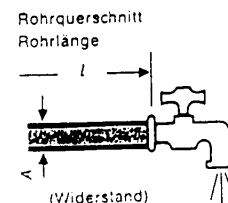
Der elektrische Widerstand, Formelzeichen R, wird in Ohm, Kurzzeichen Ω (griech.: Omega) gemessen.

$$\text{Widerstand } R [\Omega]$$

Der Widerstand R ist abhängig vom Material des Leiters (Anzahl der freien Elektronen), seiner Länge und dem Querschnitt. Er wird mit der Widerstandsmeßbrücke (Ohmmeter) gemessen.

Die Abhängigkeit des Widerstandes von Querschnitt und Länge des Leiters läßt sich mit der Wasserleitung vergleichen.

Das Wasserrohr setzt der Wasserströmung einen Widerstand entgegen, der um so größer ist, je länger das Rohr und je kleiner der Querschnitt ist.



Der elektrische Widerstand eines Leiters ist ebenfalls größer, wenn der Leiter länger ist und einen kleineren Querschnitt hat.

Widerstandsmessungen an Leitern gleicher Länge und gleichen Querschnitts zeigen bei verschiedenen Leiterstoffen unterschiedliche Widerstandswerte. So hat z.B. Kupfer einen geringen Widerstand, Eisen einen schon ca. 6mal höheren Widerstand. Der dem Material eigene (spezifische) Widerstand eines Leiterstoffes ist für Vergleichstabellen wie folgt festgelegt:

Spezifischer Widerstand:

Der spezifische Widerstand ist der Widerstand eines Leiters von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt und 20°C. Er hat das Formelzeichen ρ (griech.: rho).

$$\text{Spezifischer Widerstand } \rho \left[\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right]$$

Der spezifische Widerstand ... von Kupfer ist 0,0178 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, d.h. ein Kupferdraht von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt hat einen Widerstand von 0,178 Ω

Leitfähigkeit:

Oft wird bei Widerstandsberechnungen statt auf den spezifischen Widerstandswert auf den Tabellenwert der Leitfähigkeit zurückgegriffen.

Die Leitfähigkeit, Formelzeichen κ (griech.: kappa) ist der Kehrwert des spezifischen Widerstandes ρ

$$\text{Leitfähigkeit } \kappa \left[\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \right]$$

$$\kappa = \frac{1}{\rho}$$

Die Leitfähigkeit κ von Kupfer ist $1/0,0178 = 56 \text{ m} [\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2]$, d.h. 56 m Kupferdraht mit 1 mm^2 Querschnitt haben 1Ω

Mit den in Tabellen angegebenen spezifischen Widerstandswerten oder Werten der Leitfähigkeit lassen sich Widerstände einfach ausrechnen.

Der Widerstand R eines Leiters ist um so größer, je größer sein spezifischer Widerstand ρ (je kleiner seine Leitfähigkeit κ), je größer die Leiterlänge l und je kleiner der Leiterquerschnitt A ist.

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

$$R = \frac{l}{\kappa \cdot A}$$

Die Länge l ist in m, der Querschnitt A in mm^2 = einzusetzen.

Aus diesen Formeln können durch Umstellung sowohl die Leiterlänge als auch der Querschnitt berechnet werden.

Die Länge eines Drahtes:
$$l = \frac{R \cdot A}{\rho} \quad l = R \cdot A \cdot \kappa$$

Der Querschnitt eines Drahtes:
$$A = \frac{\rho \cdot l}{R}; \quad A = \frac{l}{R \cdot \kappa}$$

Beispiel 4.1.: Wie groß ist der Widerstand eines 4,65 m langen Heizdrahtes mit einem Durchmesser von 0,45 mm.

Lösung: $A = d^2 \cdot \pi/4 = 0,45 \text{ mm} \cdot 0,45 \cdot 3,14 /4 = 0,159 \text{ mm}^2$

$$R = \rho \cdot l / A = 1,13 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m} \cdot 4,65\text{m} / 0,159\text{mm}^2 = 33\Omega$$

Widerstände:

Jedes Material hat einen elektrischen Widerstand. Als Leitungsmaterial verwendet man überwiegend Kupfer wegen seines kleinen spezifischen Widerstandes, da hier der Widerstand möglichst gering sein soll. Das gleiche gilt für Verbraucher wie Motoren, Magnetspulen, deren Wicklungen aus Kupferdraht gefertigt sind.

In Elektrowärmegegeräten z.B. zur Raumheizung oder zur Warmwasserbereitung werden Heizwendel aus Chromnickeldraht o.ä. verwendet, hier ist der Widerstand zur Wärmeerzeugung notwendig.

Bauelemente, die dem Strom einen Widerstand entgegensetzen sollen, nennt man Widerstände. Aus Kohle oder Draht gefertigt, finden sie als Vorwiderstände, Regelwiderstände in der gesamten Elektrotechnik und Hochfrequenztechnik Verwendung.

Die Einheit des elektrischen Widerstandes, das Ohm [Ω] wird Umrechnung auch formuliert in Kiloohm, Megaohm.

Umrechnung:
$$\begin{aligned} 1 \text{ Kiloohm} &= 1 \text{ k}\Omega &= 1\,000 \Omega \\ 1 \text{ Megaohm} &= 1 \text{ M}\Omega &= 1\,000\,000 \Omega \end{aligned}$$

Vergleichsbeispiele: Einige Vergleichsbeispiele der Widerstände:

Hochohmwiderstand im Radio (1 M Ω)	1 000 000 Ω
Menschl. Körper (v. Hand zu Hand, i. Mittel)	10 000 Ω
Mittlere Glühlampe	700 Ω
1000 w Brenner	52,9 Ω

Einige Vergleichsbeispiele der spezifischen Widerstände:

... von Chromnickel	1,1
... von Eisen	0,13
... von Kupfer	0.0178

5. Ohmsches Gesetz

Sind Strom und Widerstand bekannt, so kann man die Spannung U berechnen. Sie muß um so größer sein, je größer der Widerstand ist und der Strom sein soll.

$$U = R \cdot I \quad 1 \text{ V} = 1 \Omega \cdot 1 \text{ A}$$

Der Widerstand R läßt sich berechnen, wenn Spannung und Strom bekannt sind.

$$R = \frac{U}{I} \quad 1 \Omega = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}}$$

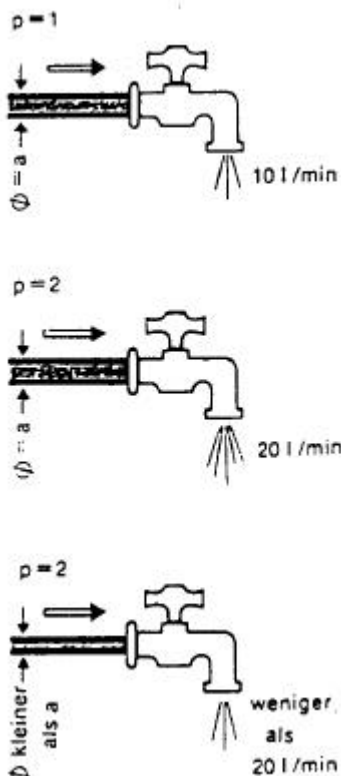
Beispiele: Beispiel 5.1.: An einem Bleiakкумуляtor mit einer Spannung von 6 V ist eine Glühlampe angeschlossen, die im Betrieb einen Widerstand von $1,5 \Omega$ hat. Wie groß ist der Strom?

Lösung:
$$I = \frac{U}{R} = \frac{6 \text{ V}}{1,5 \Omega} = 4 \text{ A}$$

Beispiel 5.2.: An welcher Spannung ist ein Heizkörper von $24,2 \dots$ angeschlossen, wenn ein Strom von $9,1 \text{ A}$ fließt?

Lösung:
$$U = R \cdot I = 24,2 \Omega \cdot 9,1 \text{ A} = 220 \text{ V}$$

5. Ohmsches Gesetz:



Die drei Grundgrößen der Elektrotechnik:

Spannung	U
Strom	I
Widerstand	R

stehen in ganz bestimmten Beziehungen zueinander, die sich wiederum mit den Verhältnissen in einer Wasserleitung vergleichen lassen:

Die fließende Wassermenge pro Zeiteinheit ist abhängig vom Wasserdruck.

Ein elektrischer Strom I kann nur fließen, wenn eine elektrische Spannung U vorhanden ist.

Die fließende Wassermenge pro Zeiteinheit ist abhängig vom Wasserdruck.

Ein elektrischer Strom I kann nur fließen, wenn eine elektrische Spannung U vorhanden ist.

Bei höherem Wasserdruck erhöht sich die ausfließende Wassermenge.

Eine höhere Spannung U hat einen größeren Strom I zur Folge

Bei größerem Strömungswiderstand durch ein engeres Rohr fließt eine kleinere Wassermenge.

Je größer der Widerstand R, desto kleiner der Strom I.

Der elektrische Strom ist also von der Spannung und dem Widerstand abhängig.

Der deutsche Physiker Ohm erkannte diese Zusammenhänge. Das nach ihm benannte Ohmsche Gesetz ist das Grundgesetz der Elektrotechnik.

Der Strom I ist um so größer, je größer die Spannung U und je kleiner der Widerstand R ist.

$$\text{Strom I [A]} = \frac{\text{Spannung U [V]}}{\text{Widerstand R [\Omega]}}$$

$$I = \frac{U}{R}$$

Wenn 2 Größen bekannt sind, lässt sich nun nach diesem Gesetz die dritte Größe ausrechnen. Das gilt für jede beliebige Stelle eines Stromkreises.

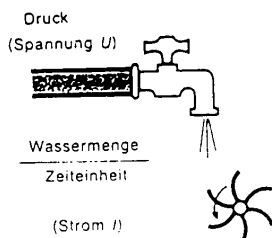
6. Elektrische Leistung

6. Elektrische Leistung: Die Leistung eines elektrischen Gerätes hängt von der Spannung und dem Strom ab. .

Die elektrische Leistung hat das Formelzeichen P und wird in Watt (Kurzzeichen W) gemessen.

Leistung P [W]

Der Vergleich mit der Wasserkraft zeigt: Je höher der Wasserdruck ist und je mehr Wasser pro Zeiteinheit durch die Leitung fließt, desto größer ist die Leistung des Schaufelrades.



Entsprechend ist die elektrische Leistung größer, wenn die Spannung höher und der Strom stärker ist.

Leistungsberechnung: Die elektrische Leistung P ist das Produkt aus Spannung U und Strom I.

$P = U \cdot I$

$1W = 1V \cdot 1A$

Beispiel 6.1.: Welche Leistung nimmt ein Scheinwerfer auf, durch den an einer Spannung von 230 V ein Strom von 2,17 A fließt?

Lösung: $P = U \cdot I = 230 \text{ V} \cdot 2,17 \text{ A} = 500 \text{ W}$

Durch Formelumstellung kann man die anderen Werte ausrechnen, z.B. den Strom, wenn die Spannung und die Leistung bekannt sind:

$$I = \frac{P}{U}$$

oder die Spannung

$$U = \frac{P}{I}$$

Beispiel 6.2.: Welcher Strom fließt durch den Niethammer Profilscheinwerfer 1200w (Leistung 1200 W, Spannung 230 V)?

Lösung: $I = \frac{P}{U} = \frac{1200 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 5,21 \text{ A}$

Sind nur Strom und Widerstand bekannt, setzt man in $P = U \cdot I$ für U nach dem Ohmschen Gesetz ($U = R \cdot I$) $R \cdot I$ ein. P ist dann $= R \cdot I \cdot I = R \cdot I^2$.

$$P = R \cdot I^2$$

Wenn nur Spannung und Widerstand bekannt ist:

$$P = \frac{U^2}{R}$$

Beispiel 6.3.: Welche Leistung hat ein Widerstand von $26,4 \Omega$ an einer Spannung von 230 V?

Lösung: $P = \frac{U^2}{R} = \frac{230 \text{ V} \cdot 230 \text{ V}}{26,4 \Omega} = 2000 \text{ W}$

Die Leistungsberechnung $P = U \cdot I$ gilt für Gleichstrom und bei Glühlampen und Wärmegeräten auch für Wechselstrom: Für andere Wechselstrom- und für Drehstromgeräte sind weitere Faktoren zu berücksichtigen (9.1).

Die Leistung ist bei den Elektrogeräten auf dem Typenschild angegeben. Diese Nennleistung gibt die Leistungsfähigkeit des Gerätes bei Nennspannung an.

Gemessen wird die Leistung mit einem Leistungsmesser (Wattmeter). Dieser mißt die Spannung und den Strom mit einem gemeinsamen Meßwerk und zeigt die Leistung als Produkt der beiden Meßgrößen an.

Vergleichsbeispiele:

Großkraftwerke	600 000 000 W
Mittlere Kraftwerke	40 000 000 W
Elektrische Lokomotive	4 000 000 W
Anschlußleistung eines vollelektrischen Hallenbades	1 500 000 W
Dimmerpack 12 Kanal	24 000 W
Dimmerpack 6 Kanal	12 000 W
Mittlere Glühlampe	60 W

Umrechnung:

Für die Einheit der elektrischen Leistung, das Watt [W] werden auch die Dimensionen Kilowatt und Megawatt verwendet.

Umrechnung: 1 Kilowatt = 1 kW = 1 000 W
 1 Megawatt = 1 MW = 1 000 000 W

1 kW elektrische Leistung entspricht 1,36 PS mechanischer Leistung. Diese Umrechnung verliert an Bedeutung, da auch die mechanische Leistung nunmehr in kW angegeben wird.

Wirkungsgrad:

Bei der praktischen Nutzung der Geräte ist die nutzbare Leistung um die Verluste kleiner als die zugeführte Leistung. Dieses Verhältnis bezeichnet man als Wirkungsgrad η (griech.: eta).

Der Wirkungsgrad $\eta = \frac{\text{abgegebene Leistung}}{\text{zugeführte Leistung}}$ $\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$

Der Wirkungsgrad elektrischer Geräte ist im allgemeinen sehr hoch und liegt meist zwischen 0,8-0,99 oder 80-99 %.

Elektrische Raumheizgeräte haben den besten Geräte-Wirkungsgrad, der mit 1 oder 100 % genommen werden kann.

Beispiel 6.4.: Ein Motor nimmt 4,5 kW elektrische Leistung auf und gibt an der Welle 3,6 kW mechanische Leistung (= 4,9 PS) ab. Wie groß ist der Wirkungsgrad?

Lösung: $\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{3,6 \text{ kW}}{4,5 \text{ kW}} = 0,8 \text{ oder } 80 \%$

7. Elektrische Arbeit

7. Elektrische Arbeit: Wird die Leistung P während einer gewissen Zeit abgegeben, so hat man eine Arbeit erhalten.

Die elektrische Arbeit hat das Formelzeichen W und wird in Wattsekunden (Kurzzeichen Ws) oder in Kilowattstunden (Kurzzeichen kWh) gemessen.

Arbeit W [Ws], [kWh]

Die Arbeit W ist um so größer, je größer die Leistung P ist und je länger die Zeit t der Leistungsabgabe ist.

$W = P \cdot t$ 1 Ws = 1 W • 1 s
1 kWh = 1 kW • 1 h

1 Kilowattstunde [kWh] = 1000 Wattstunden [Wh] = 3 600 000 Wattsekunden [Ws].

Da das Rechnen mit Wattstunden in der Elektrotechnik meist zu große Zahlen ergibt, ist in der Praxis die Kilowattstunde (kWh) für das Maß der geleisteten elektrischen Arbeit üblich.

Die elektrische Arbeit wird vom Zähler gemessen („Stromverbrauch“). Die Größe von Spannung und Strom = Leistung setzt über Spulen eine Zählerscheibe in Bewegung. Die Umdrehungen werden von einem Zählwerk gezählt (• Zeit), das die kWh direkt anzeigt.

Beispiel 7.1.: Welche elektrische Arbeit wandelt ein Wärmegerät 4 kW, während einer Betriebszeit von 4 h in Wärmeenergie um?

Lösung: $W = P \cdot t = 4 \text{ kW} \cdot 4 \text{ h} = 16 \text{ kWh}$

Beispiel 7.2.: Wie groß ist die elektrische Arbeit, wenn bei 230 V ein Strom von 8,7 A 5 h lang fließt?

Lösung: $W = P \cdot t$ $W = U \cdot I \cdot t = 230 \text{ V} \cdot 8,7 \text{ A} \cdot 5 \text{ h} = 10 \text{ kWh}$

Umrechnungswerte:

Die elektrische Arbeit wird auch elektrische Energie genannt. Diese Energie läßt sich in andere Energien umwandeln, z.B. durch Motoren, Magnete in mechanische Energie, durch Heizwiderstände in Wärmeenergie.

8. Grundsaltungen

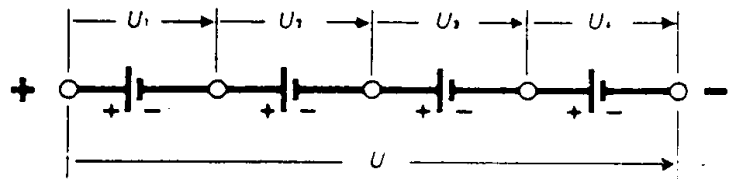
Spannungsquellen und Widerstände werden in verschiedener Weise zusammengeschaltet.

Reihenschaltung:

Bei der Reihen- oder Hintereinanderschaltung werden die Spannungsquellen oder die Widerstände so geschaltet, daß sie nacheinander vom gleichen Strom durchflossen werden.

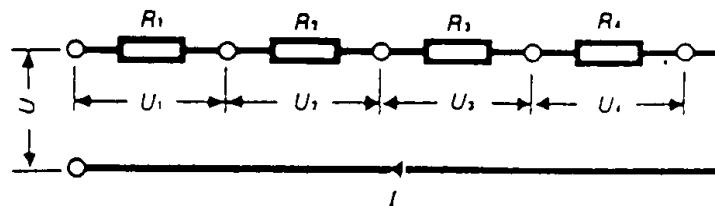
Bei der Reihenschaltung von Spannungsquellen werden die ungleichen Pole der Elemente miteinander in Reihe verbunden und man erhält eine Batterie, deren Spannung U die Summe der Einzelspannungen der Elemente ist.

Beispiel 8.1.: Eine Batterie von 4 hintereinander geschalteten Elementen á 1,5 V hat welchen Spannung?



Lösung: $U = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 = 4 \cdot 1,5 \text{ V} = 6 \text{ V}$

Bei der Reihenschaltung von Widerständen ist der Gesamtwiderstand gleich der Summe der Einzelwiderstände.



Gesamtwiderstand $R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \dots$

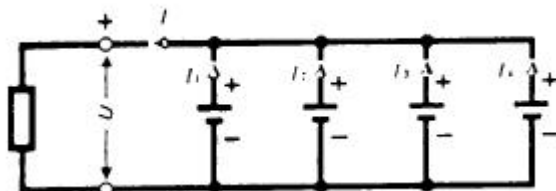
Die Widerstände werden alle vom gleichen Strom durchflossen.

An jedem Widerstand liegt ein Teil der Spannung U . Die Summe dieser Teilspannungen, auch Spannungsabfälle genannt, ist so groß wie die angelegte Spannung (Kirchhoffsche Maschenregel).

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + \dots$$

Da das Ohmsche Gesetz für jeden Teil des Stromkreises gilt, ist die Teilspannung U_1 z.B.:

$$U_1 = R_1 \cdot I$$



Die Gesamtspannung der Batterie ist so groß wie die Spannung eines Elementes.

Beispiel 8.5.: Mit welchem Strom kann eine Batterie von 4 parallelgeschalteten Elementen von 1,5 V belastet werden, wenn der Strom eines Elementes 0,2 A betragen kann? Spannung der Batterie?

Lösung: $I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 4 \cdot 0,2 \text{ A} = 0,8 \text{ A}$
 $U = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 = 1,5 \text{ V}$

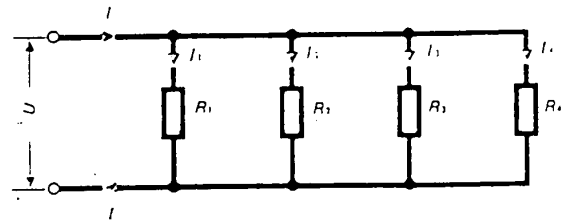
Bei der Parallelschaltung von Widerständen sind die Widerstände nebeneinandergeschaltet und liegen an der gleichen Spannung.

$U = U_1 = U_2 = U_3 = U_4$ usw.

Der Gesamtstrom I ist gleich der Summe der Zweigströme.

$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + \dots$

Der Gesamtwiderstand (Ersatzwiderstand) R von mehreren parallel geschalteten Widerständen ist kleiner als der kleinste Einzelwiderstand.



$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \dots$$

Diese Formel lässt sich nur bei 2 parallelen Widerständen vereinfachen. Der Ersatzwiderstand ist:

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

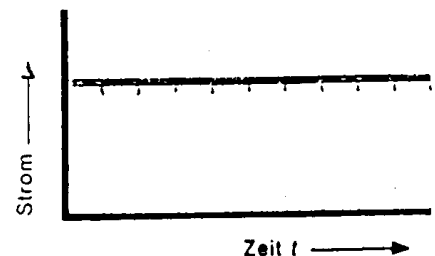
9. Stromarten

Die Stromarten werden nach der Bewegungsrichtung der Elektronen unterschieden in Gleichstrom und Wechselstrom.

Gleichstrom:

Bewegen sich die freien Elektronen aufgrund einer Gleichspannung ständig in gleicher Richtung, so fließt ein Gleichstrom (Zeichen: -).

Das Schaubild zeigt den gleichmäßigen Verlauf eines Gleichstromes während einer Zeit t.



Die Konstanz der Gleichspannung und des Gleichstromes lässt

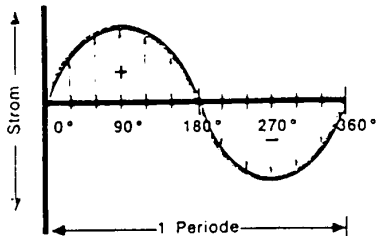
U

Berechnungen nach dem Ohmschen Gesetz $I = \frac{U}{R}$ und der

Leistung $P = U \cdot I$ uneingeschränkt zu.

Wechselstrom:

Im Generator wird durch gleichmäßige Rotation von Leiterschleifen (Spulen) im Magnetfeld, eine sinusförmige Wechselspannung erzeugt.



Bewegen sich die freien Elektronen aufgrund einer Wechselspannung mit regelmäßiger Richtungsänderung, so fließt ein Wechselstrom (Zeichen:~). Der Wechselstrom ändert regelmäßig wiederholend seine Richtung (periodisch) und Stärke.

Das Schaubild zeigt den Verlauf eines Wechselstromes während einer Umdrehung eines 2poligen Generators = 360° Drehwinkel.

Der Strom steigt von Null auf einen positiven Höchstwert, sinkt wieder auf Null, wechselt die Richtung, steigt auf einen negativen Höchstwert und sinkt sodann auf Null. Diese Wellenlinie (Sinuskurve) aus zwei Halbwellen umfaßt eine Periode, auch Phase oder Schwingung genannt.

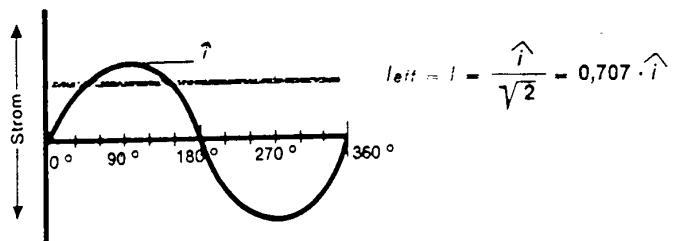
Die Anzahl der Perioden je Sekunde wird mit Frequenz bezeichnet. Die Frequenz hat das Formelzeichen f und wird in Hertz (Kurzzeichen: Hz) gemessen.

Frequenz f [Hz]

In Deutschland sind 50 Hz die übliche Wechselstromfrequenz der Versorgungsnetze. Das bedeutet, daß der Strom in einer Sekunde im Wechsel 50 mal in der einen und 50 mal in der anderen Richtung fließt.

Der Wechselstrom hat, wie die Sinuskurve zeigt, ständig andere Augenblickswerte i , vom Höchstwert (Scheitelwert) \hat{i} bis zum Nullpunkt. Ein Wechselstrom bringt die gleiche Wärmewirkung wie ein gleichgroßer Gleichstrom. Das liegt darin begründet, daß man bei Berechnungen mit Wechselgrößen ihre Effektivwerte einsetzt. Effektivwerte sind Quadratische Mittelwerte, welche die gleichen Effekte hervorrufen wie gleichgroße Gleichstromwerte. Auch die Meßinstrumente messen die Effektivwerte von Wechselspannung und Wechselstrom.

Aus mathematischen Ableitungen ergibt sich, daß der Effektivstrom I_{eff} eines sinusförmigen Wechselstromes das 0,707 fache des Scheitelwertes \hat{i} ist.



Das gleiche gilt für die Wechselspannung:

$$U_{eff} = U = \hat{u} / \sqrt{2} = 0,707 \cdot \hat{u}$$

Beispiel 9.1:

Eine Wechselspannung U (U_{eff}) von 230 V (230 V~) hat einen Scheitelwert \hat{u} von:

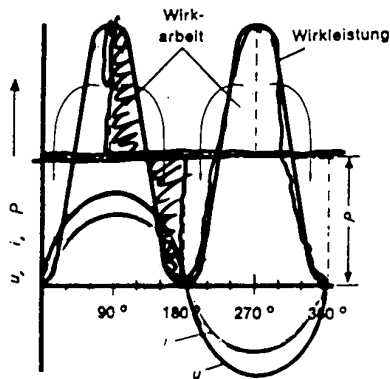
$$\hat{U} = U \cdot \sqrt{2} = 230 \text{ V} \cdot 1.41 = 325 \text{ V}$$

Einen Widerstand, in dem der Wechselstrom die gleiche Wirkung wie ein Gleichstrom zeigt, nennt man Wirkwiderstand.

Wirkwiderstände sind z.B. Leitungswiderstände, Glühlampen, Heizwiderstände in Elektrowärmegegeräten, in ihnen entsteht Stromwärme.

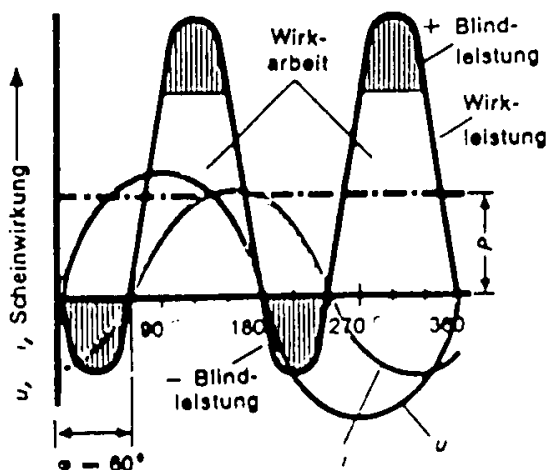
In einem Wechselstromkreis mit diesen Wirkwiderständen ist das Ohmsche Gesetz anwendbar und auch die Berechnung der Leistung, hier Wirkleistung $P = U \cdot I$ möglich

In einem Wechselstromkreis mit einem Wirkwiderstand, z.B. einem Heizgerät, erreichen Strom und Spannung gleichzeitig die Scheitelwerte und Nullpunkte. Spannung und Strom sind phasengleich.



Das Schaubild zeigt die Phasengleichheit der Spannungs- und Stromkurve und die daraus resultierende Wirkleistungskurve. Die Wirkleistung ist das Produkt aus Spannung und Strom. Deshalb ist auch bei negativen Spannungs- und Stromwerten die Leistung positiv. Die von der Leistungskurve umfaßte Fläche ist die Wirkarbeit, die in Stromwärme umgewandelt wird. Die Flächen der Leistungsspitzen kann man sich zum „Ausfüllen“ der Leistungstäler vorstellen und erhält eine Wirkleistung P , die der Gleichstromleistung gleich ist.

Liegt eine Spule, z.B. die Wicklungen eines Motors, im Wechselstromkreis, so tritt eine Phasenverschiebung ein. Die Spannung muß zunächst eine von ihr in der Spule induzierte Gegenspannung überwinden, ehe der Strom fließen kann. Der Strom eilt der Spannung um einen Phasenverschiebungswinkel φ (griech.: phi) nach.



Das Schaubild zeigt eine Phasenverschiebung, bei der der Strom der Spannung um $\varphi = 60^\circ$ nacheilt. Infolge der zeitlichen Verschiebung stellt das Produkt aus Spannung und Strom nur eine scheinbare Leistung, eine Scheinleistung dar.

Die Scheinleistung setzt sich zusammen aus der Wirkleistung und einer Blindleistung. Die Blindleistung wird zum Aufbau des Magnetfeldes der Spule benötigt und beim Abbau des Magnetfeldes ins Netz zurückgegeben (negative Leistung). Diese Energie pendelt ständig zwischen Erzeuger und Verbraucher hin und her, ohne Wirkarbeit zu verrichten.

Im Wechselstromkreis, in dem aufgrund einer Phasenverschiebung die Spannungs- und Stromwerte zeitlich nicht zusammenfallen, kann ihr Produkt nicht die wirkliche Leistung sein. Das Produkt muß mit dem Leistungsfaktor multipliziert werden. Der Leistungsfaktor $\cos\varphi$ (cosinus phi) gibt an, wieviel von der Scheinleistung in Wirkleistung umgesetzt wird.

$$\text{Leistungsfaktor } \cos \varphi = \frac{\text{Wirkleistung}}{\text{Scheinleistung}}$$

Die Wirkleistung des Wechselstromes ist das Produkt von Spannung U, Strom I und Leistungsfaktor:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Beispiel 9.3.: Der Leistungsfaktor eines Einphasen-Wechselstrommotors ist mit $\cos \varphi = 0,85$ angegeben. Seine Wirkleistung beträgt 1,2 kW. Welcher Strom fließt bei 230 V ~?

$$\text{Lösung: } P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad I = \frac{P}{U \cdot \cos \varphi} = \frac{1200 \text{ W}}{230 \text{ V} \cdot 0,85} = 6,14 \text{ A}$$

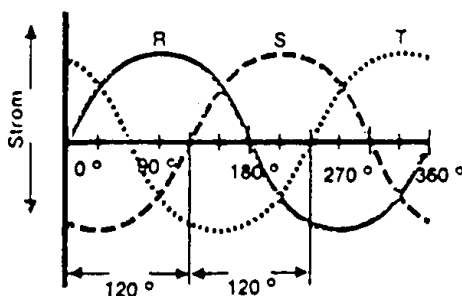
Da der aus der Blindleistung resultierende Blindstrom die Leitungen mitbelastet (größerer Querschnitt!), ohne Wirkleistung zu erbringen, ist man bemüht, einen guten Leistungsfaktor in einer elektrischen Anlage zu erhalten. Bei reinem Wirkstrom (Elektrowärme) ist der Leistungsfaktor $\cos \varphi = 1$.

Es gibt elektrische Bauelemente die im Wechselstromkreis eine der Spule entgegengesetzte Phasenverschiebung verursachen, die Kondensatoren. Hier eilt der Strom der Spannung voraus. Hat eine elektrische Anlage durch viele Motoren oder Drosseln in Scheinwerfern mit Gasentladungslampen einen schlechten Leistungsfaktor, gleicht man die Blindleistung durch Kondensatoren aus (Kompensation) und verbessert somit den Leistungsfaktor.

Drehstrom:

Von den Stromarten hat der Drehstrom (Zeichen: 3~) die größte technische Bedeutung erlangt. Drehstrom ist ein dreiphasiger Wechselstrom. Im Drehstromgenerator sind drei Phasenwicklungen (Stränge), um 120° versetzt, symmetrisch angeordnet. Durch ein umlaufendes Magnetfeld (Drehfeld) werden in den drei Wicklungen drei gleichgroße Wechselspannungen erzeugt. Sie erreichen ihre Scheitelwert- und Nullpunkte jeweils nach $120^\circ = \frac{1}{3}$ Periode, sind also um je 120° phasenverschoben.

Für die Übertragung des Drehstromes wären 6 Leiter erforderlich. Die 3 Phasen lassen sich jedoch durch eine geeignete Schaltung miteinander verketteten, und man benötigt nur 3 Leiter. Diese Leiter sind durch die zeitliche Verschiebung der Spannungen und Ströme abwechselnd „Hinleiter“ und „Rückleiter“. Die 3 Hauptleiter haben die Bezeichnung L1, L2, L3.



Das Diagramm zeigt den um 120° verschobenen Phasenverlauf des Drehstromes.

Fließt beim Phasenwinkel 90° ein positiver Höchststrom der Phase L1 (jetzt „Hinleiter“), fließen im gleichen Augenblick zwei negative Ströme der Phasen L2 und L3 (jetzt „Rückleiter“) mit halbem Höchstwert. Die Summe der Werte ist in jedem Augenblick gleich Null.

Die Verkettungsschaltungen im Drehstromkreis sind die Dreieckschaltung und die Sternschaltung. Die Verkettung wird in Drehstromberechnungen durch den Verkettungsfaktor $\sqrt{3} = 1,73$ berücksichtigt.

In der Dreieckschaltung (Zeichen: Δ) ist jedes Strangende (U2, V2, W2) mit dem Anfang (U1, V2, W2) mit dem Anfang (U1, V1, W1) eines anderen Stranges verbunden.

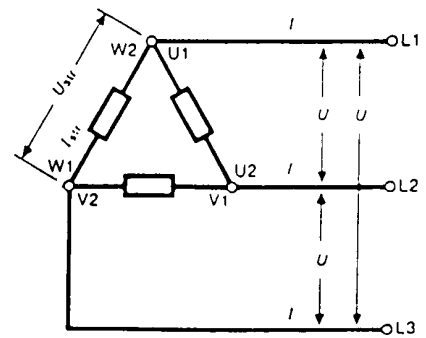
Die Spannung der Außenleiter, die Leiterspannung U , ist gleich der Spannung eines Stranges, der Strangspannung U_{Str} .

Der Leiterstrom I ist bei der Dreieckschaltung um den Verkettungsfaktor $\sqrt{3}$ mal so groß wie der Strangstrom I_{Str} (Stromverkettung).



$$U = U_{Str}$$

$$I = \sqrt{3} \cdot I_{Str}$$



Beispiel 9.4.: Die Wicklungen eines Riggingmotors sind in Dreieckschaltung für den Anschluß an 400 V Drehstrom ausgelegt (400 V 3- Δ). In den Anschlußleitungen fließt ein Strom von 4 A. Wie hoch ist die Spannung und der Strom einer Wicklung

Lösung: $U_{Str} = U = 400 \text{ V}$

$$I_{Str} = \frac{I}{\sqrt{3}} = \frac{4 \text{ A}}{1,73} = 2,28 \text{ A}$$

In der Sternschaltung (Kurzzeichen: Y) sind die Strangenden (U_2 , V_2 , W_2) miteinander zum Sternpunkt verbunden.

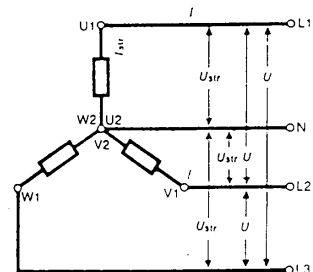
Die Leiterspannung U ist bei der Sternschaltung um den Verkettungsfaktor $\sqrt{3}$ mal so groß wie die Strangspannung U_{Str} (Spannungsverkettung).

Der Leiterstrom I ist gleich dem Strangstrom I_{Str} .



$$U = \sqrt{3} \cdot U_{Str}$$

$$I = I_{Str}$$



Beispiel 9.5.: Die 3 Wicklungen des Riggingmotors sind jetzt in Sternschaltung für den Anschluß an 400 V Drehstrom ausgelegt (400 V 3- Y). In den Anschlußleitungen fließt ein Strom von 4 A. Wie hoch ist die Spannung und der Strom einer Wicklung?

$$\text{Lösung: } U_{Str} = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{400 \text{ V}}{1,73} = 230 \text{ V}$$

$$I_{Str} = I = 4 \text{ A}$$

Die Spannungsverkettung wird in den Vierleiternetzen nutzbar gemacht. Es wird außer den 3 Außenleitern (die Phasen L1, L2, L3) ein zusätzlicher Leiter aus dem Sternpunkt des Generators herausgeführt, der Mittelleiter (Nulleiter) N.

Bei symmetrischer Belastung der Phasen fließt im Mittelleiter kein Strom, bei ungleicher Belastung ein ,geringer Ausgleichsstrom.

Das Mitführen des Mittelleiters hat den Vorteil, daß in diesen Netzen zwei Spannungen zur Verfügung stehen. In Deutschland ist 230/400 V die übliche Spannung der Drehstromnetze, d.h. die

Spannung zwischen je 2 Phasen beträgt 400 V und zwischen den Phasen und dem Mittelleiter 230 V.

Es ergeben sich folgende Anschlußmöglichkeiten der Verbraucher:

- a) Dreiphasiger Anschluß an 400 V zwischen den Außenleitern L1, L2, L3 („Kraftstrom“) für Drehstrommotoren und Wärmegeräte hoher Leistung (Durchlauferhitzer und Wärmespeicher).
- b) Zweiphasiger Anschluß an 400 V zwischen zwei Außenleitern für Wechselstrommotoren und Wärmegeräte hoher Leistung (Warmwasserbereiter über 2 kW).
- c) Einphasiger Anschluß an 230 V zwischen einem Außenleiter und dem N-Leiter („Lichtstrom“) für Haushaltsgeräte, Lichtenanlagen, Wärmegeräte kleiner Leistung.

Aus dem Leiterstrom I, der Leiterspannung U, dem Leistungsfaktor $\cos\varphi$ und dem Verkettungsfaktor $\sqrt{3}$ resultiert die Wirkleistung des Drehstromes:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

Da in der Dreieckschaltung der Strom, in der Sternschaltung die Spannung verkettet ist, berechnet man die Leistung mit dieser Formel für beide Schaltungen.

Beispiel 9.6.: Wie groß ist der Strom in der Zuleitung zu 18 x 2 kW Lichtenanlage (36 kW, 400 V 3~...) bei voll eingeschalteter Leistung?

Lösung: $P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{36000 \text{ W}}{1,73 \cdot 400 \text{ V} \cdot 1} = 52,02 \text{ A}$$

© 1998 Robert Hohn